

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПЫЛИ МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК»

Савостеенко Г.А.¹, Таскаев С.В.¹, Горькавый Н.Н.^{1,2}, Дудоров А.Е.¹

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия, tsv@csu.ru

²SSAI/Goddard Space Flight Center/NASA

Падение метеорита «Челябинск» сопровождалось взрывом, в результате основная масса перешла в пыль и была сосредоточена в газопылевом шлейфе [Горькавый, Дудоров, 2016]. При исследовании образцов пыли найдены фрагменты углеродных структур, обладающие признаками кристаллической симметрии с осью шестого порядка.

Привлекло внимание наличие объекта, интенсивно отражающего свет. Частица с ярко выраженной осью шестого порядка по форме близка к сферической, однако имеются четкие признаки огранки, аналогичной огранке по базисным плоскостям кристаллов (см. рис. 1).

Углеродные частицы находятся в метеоритной пыли в достаточно большой концентрации и образуют агломераты по несколько штук (см. рис. 2). Особый интерес представляет вытянутая частица на рис. 2 (справа), она принципиально отличается от сферических частиц, но имеет единый общий признак-огранку. Отличие в форме должно быть обусловлено различными условиями роста или различными центрами кристаллизации. Предполагается, что в основе может выступать фуллерен и нанотрубка, однако, четких доказательств этой гипотезы нет.

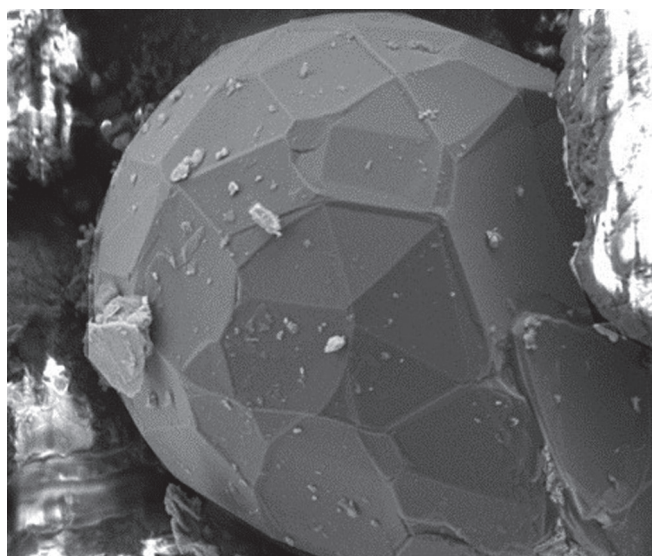
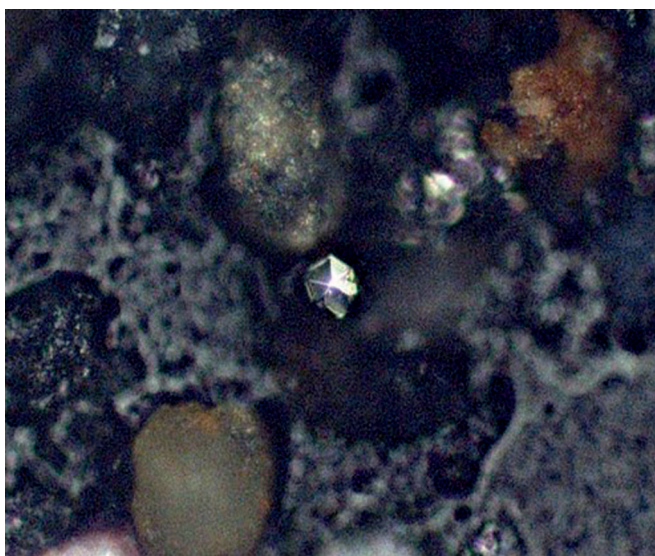


Рис. 1. Углеродная частица в пыли Челябинского метеорита: ОМ (слева); РЭМ (справа)

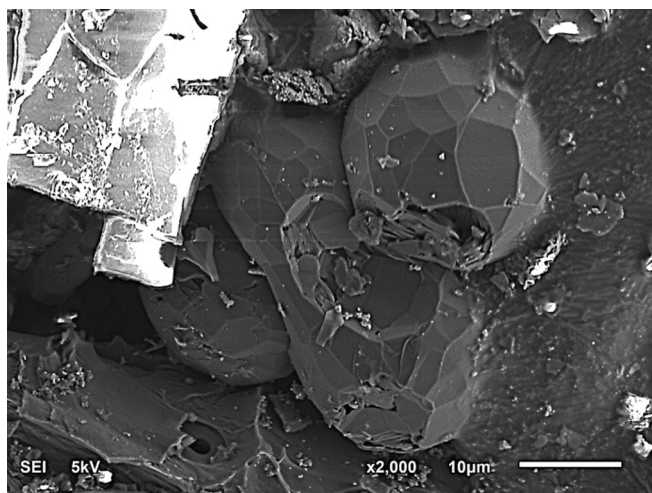
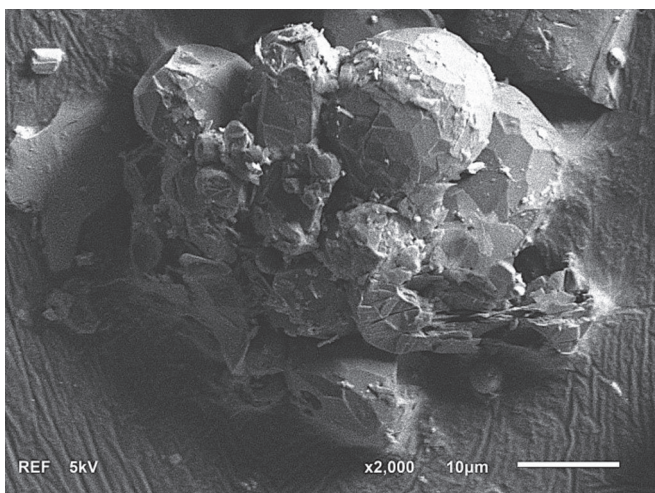


Рис. 2. Изображение углеродных частиц, полученные методом электронной микроскопии

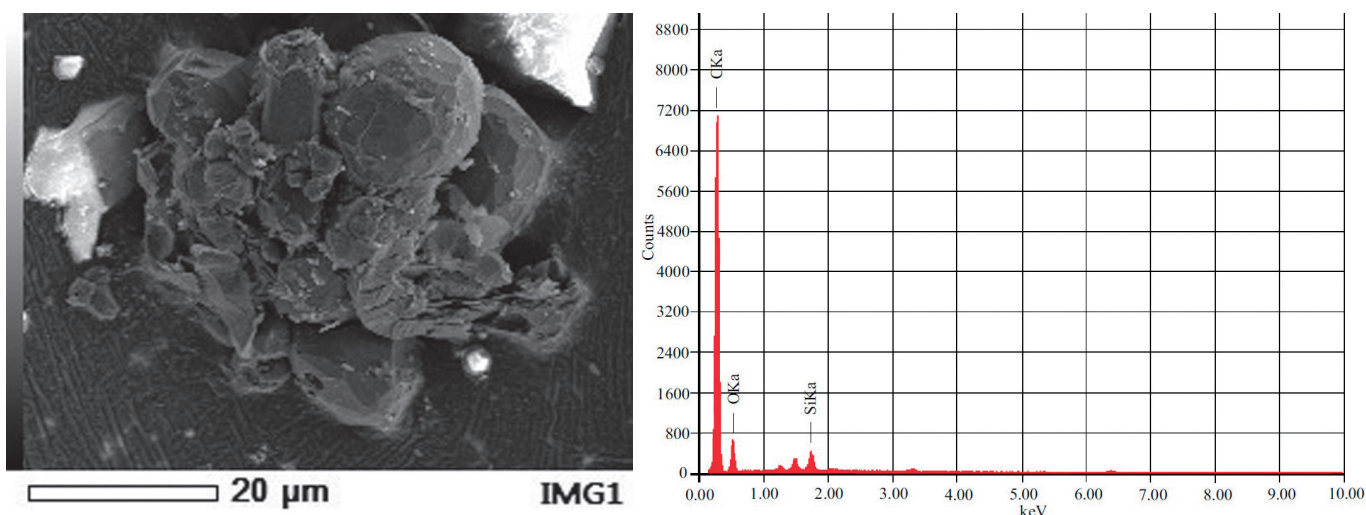


Рис. 3. Элементный состав углеродной частицы

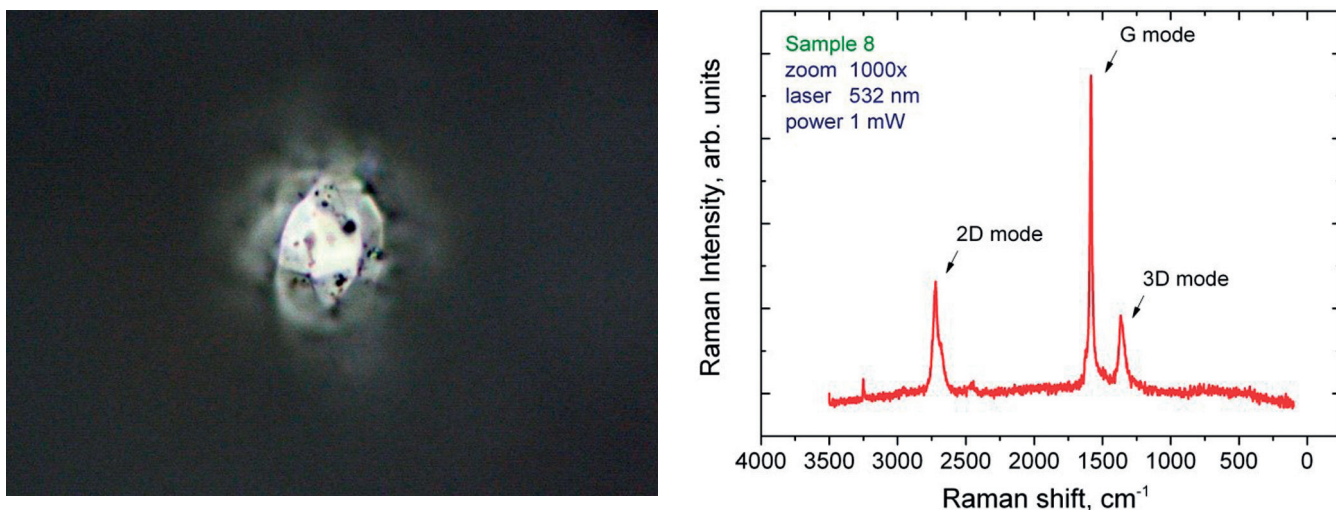


Рис. 4. Углеродная частица в пыли Челябинского метеорита: ОМ (слева); Раман-спектр (справа)

Для выяснения природы кристаллизации в такого рода структуру исследования пыли проводились методами оптической, электронной микроскопии, а также проведены исследования методами энергодисперсионной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеивания света и рентгеновской микродифракции.

Результаты исследования методом энергодисперсионной спектроскопии приведены на рис. 3. Энергодисперсионный микроанализ объекта показывает, что он состоит в основном из углерода. Однако, наблюдаемая четко выраженная ось симметрии шестого порядка не характерна для кристаллической формы углерода в виде алмаза, базисные плоскости которого представлены гранями тетраэдров.

Экспериментальные исследования с помощью спектроскопии комбинационного рассеивания света представлены на рис. 4. Наличие пика 3D mode на частоте $\sim 1330 \text{ cm}^{-1}$ в нашем случае может быть вызвано множественными дефектами структуры, гра-

ниями и, например, на спектрах, представленных на рис. 4 эта мода присутствует, однако говорить о том, что структура в этом случае может быть отнесена к смеси фаз, представленных sp-2 и sp-3 гибридизованными атомами углерода со 100% уверенностью нельзя. Таким образом, на данном этапе, несмотря на наличие признаков кристаллической симметрии (в частности гексагональной), наличие пика, характерного для sp-3 гибридизованных атомов углерода на некоторых спектрах комбинационного рассеивания света, классифицировать объект как смешанное состояние графита и алмаза (гексагонального или кубического) нельзя.

Методом рентгеновской микродифракции обнаружены только рефлексы, соответствующие межплоскостному расстоянию $d \approx 3.35 \text{ \AA}$. Интенсивность сигнала достаточно низкая (максимально 2000 событий для 700 сек экспозиции), можно предположить, что рефлексы являются наиболее сильными и формируются основной частью структуры части-

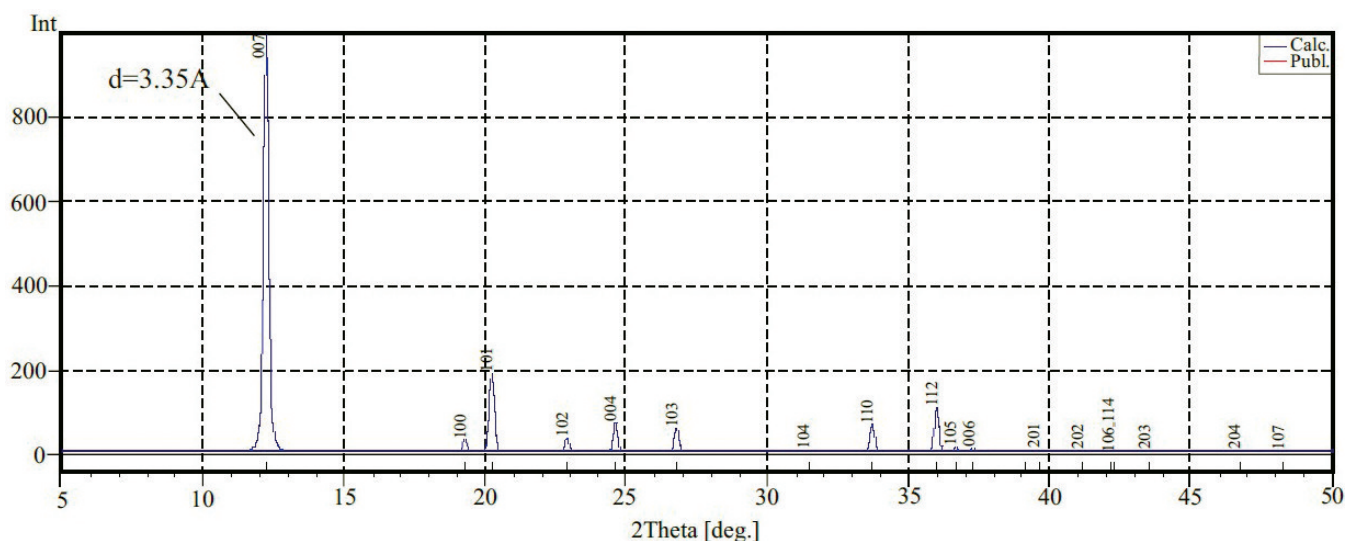


Рис. 5. Рентгеновская порошковая дифракция графита в случае Mo K α излучения

цы, а остальные можно отнести к фоновому шуму. Рефлексы с межплоскостным расстоянием $d \approx 3.35$ Å могут принадлежать только одной аллотропной форме углерода – рефлексу (002) графита рис. 5.

Тот факт, что обнаружено несколько рефлексов (002), относящихся к графиту, показывает, что изучаемая углеродная частица не является монокристаллом, а состоит из нескольких кристаллитов (является агрегатом). Возможно предположить, что каждая грань изучаемой частицы является плоскостью (001) графита. Тем не менее, очевидно, что благодаря раздельному распределению рефлексов графита (002), частица не сформирована порошком и не является структурой типа «углеродного лука».

Резюмируя полученные с помощью метода микро-дифракции результаты можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные частицы состоят только из углерода на всем диапазоне исследования методом энергодисперсионного микроанализа.
2. Все углеродные частицы создают дифракционную картину как набор ориентированных графитовых граней/паллет.

3. Большие частицы имеют несколько большие дифрактограммы, чем средние графитовые кристаллиты.
4. Не обнаружено рефлексов от нанотрубок/алмазов/лонсдейлита.

В связи с малостью объектов, участвовавших в анализе, задача по получению качественных спектров очень сложная, однако исходя из полученных данных можно с абсолютной уверенностью сказать, что исследуемые нами частицы представляют собой упорядоченный графит, а одна из исследованных частиц имеет спектр близкий к монокристаллу графита.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-12-10008, РФФИ 16-07-000679 и Госзадания МОиН РФ №3.6782.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинский суперболид. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. 223 с.